

УДК 681.51:681.3

РЕЛЕЙНО-ЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ БЕСЩЕТОЧНЫМИ  
СИНХРОННЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

Ю.Н. Хижняков, А.А. Южаков

Пермский государственный технический университет

E-mail: luda@at.pstu.ac.ru

Рассмотрен релейно-логический метод управления параллельной работой бесщетоных синхронных генераторов в режиме параллельной работы с сетью в полярной системе координат. Разработаны варианты структурных схем и алгоритмы управления. Достоинством метода является применение «сильного» регулирования, которое обеспечивает равномерное распределение реактивной и активной мощности между бесщетоными синхронными генераторами с квазистатическими внешними характеристиками.

**Ключевые слова:**

Бесщетоный синхронный генератор, релейно-логический метод, блок динамического приоритета, выявитель, датчики модуля полного тока статора, датчики активного тока статора, блок пороговых элементов, полярная система координат, алгоритм управления.

**Key words:**

Brushless synchronous generator, relay-logical method, dynamical priority unit, detector, full stator current module sensors, active stator current sensors, threshold elements unit, polar coordinate system, scheduling algorithm.

**Введение**

В настоящее время разными фирмами выпускаются блочно-контейнерные газотурбинные электростанции (ГТЭС). Разработанные ГТЭС мощностью 2,4...63 МВт применяются для электроснабжения потребителей районов, где отсутствуют линии электропередач высокого напряжения, либо там, где их экономически целесообразно устанавливать дополнительно. ГТЭС содержит в себе несколько бесщетоных синхронных генераторов (БЩСГ) с воздушным охлаждением, которые приводятся во вращение газотурбинными установками на базе авиационных двигателей. БЩСГ является преобразователем механической энергии, вырабатываемой авиационным двигателем, в электрическую энергию. Мощность авиационного двигателя примерно равна мощности БЩСГ. Общими требованиями к ГТЭС являются параллельная работа нескольких БЩСГ на нагрузку в автономном режиме и с участием сети бесконечной мощности при выполнении всех требований по качеству вырабатываемой электроэнергии согласно ГОСТ 13109–97.

Традиционно управление параллельной работой синхронных генераторов малой и средней мощности выполняется по методу внутреннего статизма [1]. По этому методу статизм внешних характеристик генераторов должен быть не менее 6 %.

С целью повышения точности распределения реактивных и активных составляющих токов нагрузки между БЩСГ предлагается релейно-логический метод (РЛМ) [2].

РЛМ есть метод управления параллельной работой БЩСГ, где релейно сравниваются относительные токи статора параллельно работающих генераторов с последующей логической обработкой сигналов. Рассмотрим варианты реализации структурных схем и алгоритмов управления параллельной работой БЩСГ с сетью в полярной системе координат:

А. Особенностью управления параллельной работой БЩСГ с сетью бесконечной мощности в полярной системе координат (ПСК) является сравнение векторов полного тока статоров БЩСГ через сравнение интервалов времени  $\Delta t$ , пропорциональных фазовым сдвигам между токами и напряжением одноименной фазы статоров БЩСГ, и релейно-логическое сравнение модулей полного тока.

Известно, что напряжение фазы «а» на шинах генераторов изменяется по закону  $u_a = U_m \sin \omega t$ , а ток, например, в фазе «а»  $i_a = I_m \sin(\omega t - \varphi)$ . В момент прохождения тока  $i_a$  через нуль, следует

$$i_a(\Delta t) = I_m \sin(\omega \Delta t - \varphi) = 0; \\ (\omega \Delta t - \varphi) = 0 \text{ или } \varphi = \omega \Delta t, \quad (1)$$

т. е. фазовый сдвиг  $\varphi$  между напряжением и током пропорционален временному интервалу  $\Delta t$  между моментами времени перехода кривых напряжения  $u_a$  и тока  $i_a$  через нуль;  $\omega$  – круговая частота. Очевидно также, что активная и реактивная мощности фазы генератора определяются по формулам (2) [3]:

$$P = UI \cos \varphi; \\ Q = UI \sin \varphi. \quad (2)$$

Тогда угол сдвига между вектором напряжения и вектором тока одноименной фазы первого генератора определяется по формуле (3)

$$\varphi_1 = \arccos \frac{I_{a1}}{I_1} = \arcsin \frac{I_{p1}}{I_1}, \quad (3)$$

где  $I_{a1}$ ,  $I_{p1}$  – активная и реактивная составляющие тока первого генератора.  $I_1$  – модуль полного тока первого генератора.

Подставив (3) в (1), получим временной интервал  $\Delta t_1$

$$\Delta t_1 = \frac{1}{\omega_1} \arccos \frac{I_{a1}}{I_1} = \frac{1}{\omega_1} \arcsin \frac{I_{p1}}{I_1}. \quad (4)$$

Согласно (4) следует, что чем больше активная мощность генератора, тем меньше  $\Delta t$  и наоборот, а также, чем больше реактивная мощность генератора, тем больше  $\Delta t$  и наоборот.

Если ввести в рассмотрение параллельно работающий второй генератор, то для него, аналогично, можно записать:

$$\Delta t_2 = \frac{1}{\omega_2} \arccos \frac{I_{a2}}{I_2} = \frac{1}{\omega_2} \arcsin \frac{I_{p2}}{I_2}. \quad (5)$$

Сравнивая интервалы времени  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  при равных модулях полных токах  $I_1$  и  $I_2$ , можно выявить генератор с большим или меньшим значением реактивной/активной мощности. В выражениях (4), (5) обратная функция косинуса берется от относительных активных составляющих токов БЩСГ, а обратная функция синуса — от относительных реактивных составляющих токов БЩСГ, базисными значениями которых являются модули полных токов одноименной фазы. В выражениях (4), (5) принимается

$$\omega_1 = \omega_2 = \dots = \omega_c,$$

где  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_c$  — круговая частота, соответственно, первого и второго генераторов и сети бесконечной мощности.

Таким образом, в качестве входных параметров для управления параллельной работы БЩСГ в ПСК с релейной настройкой обосновано применение временного интервала  $\Delta t$  и модуля полного тока БЩСГ.

При параллельной работе БЩСГ на нагрузку, имеющей активно-индуктивный характер, очевидно, что БЩСГ, имеющий меньший временной интервал, имеет минимальный реактивный ток и максимальный активный ток, а БЩСГ, имеющий больший временной интервал, имеет максимальный реактивный ток и минимальный активный ток.

Распределение реактивной/активной составляющих полной мощности между генераторами осуществляется ранжированием генераторов по временному интервалу (фазовому сдвигу между векторами тока и напряжения одноименной фазы) с помощью блока динамического приоритета (БДП) [4], реализующего обработку входных сигналов с относительным приоритетом типа «первый пришел — первый обслужен».

Логическое описание БДП:

- у БЩСГ, занимающего первое место в очереди, ток статора первым проходит через нуль после начала положительного полупериода напряжения на шинах.
- у БЩСГ, занимающего последнее место в очереди, ток статора последним проходит через нуль после начала положительного полупериода напряжения на шинах.

Ранжирование параллельно работающих БЩСГ с релейно-логическим управлением с помо-

щью БДП в каждый положительный полупериод фазного напряжения на шинах с частотой 50 Гц требует блок фиксации первого места в очереди, т. к. частота регулирования много меньше частоты питающего напряжения. Выход блока фиксации первого места в очереди является выходом выявителя  $V_1$ , который включает в себя нуль-орган по напряжению (НО<sub>н</sub>), нуль-органы тока (НО) по числу БЩСГ, RS-триггеры по числу БЩСГ и БДП.

Для определения БЩСГ с максимальным модулем полного тока нагрузкой через релейное сравнение введен выявитель  $V_2$  с настройкой на максимум, построенный на основании полного графа. Выявитель  $V_2$  включает в себя блок пороговых элементов (БПЭ), дешифратор (ДШ) и датчики модулей полного тока (ДМПТ) по числу БЩСГ.

Выявитель  $V_2$  имеет математическое описание в виде системы логических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{V}_1 &= P_{1-2} \wedge P_{1-3} \wedge \dots \wedge P_{1-i} \wedge \dots \wedge P_{1-j} \wedge \dots \wedge P_{1-n}; \\ \tilde{V}_2 &= \bar{P}_{2-1} \wedge \bar{P}_{2-3} \wedge \dots \wedge P_{2-i} \wedge \dots \wedge P_{2-j} \wedge \dots \wedge P_{2-n}; \\ &\dots \dots \dots \\ \tilde{V}_i &= \bar{P}_{i-1} \wedge \bar{P}_{i-2} \wedge \dots \wedge P_{i(i-1)} \wedge \dots \wedge P_{i-j} \wedge \dots \wedge P_{i-n}; \\ &\dots \dots \dots \\ \tilde{V}_j &= \bar{P}_{j-1} \wedge \bar{P}_{j-2} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{j-i} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{j-(j-1)} \wedge \dots \wedge P_{j-n}; \\ &\dots \dots \dots \\ \tilde{V}_n &= \bar{P}_{n-1} \wedge \bar{P}_{n-2} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{n-i} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{n-j} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{n(n-1)} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $\tilde{V}_1, \tilde{V}_2, \dots, \tilde{V}_n$  — выходы выявителя  $V_2$  с настройкой на максимум;  $n$  — число генераторов ГТЭС;  $P_{1-2}, \dots, P_{1-j}, \dots, P_{1-(n-1)}$  — прямые пороговые функции сравнения модулей полного тока;  $\bar{P}_{1-2}, \dots, \bar{P}_{1-j}, \dots, \bar{P}_{1-(n-1)}$  — инверсные пороговые функции сравнения модулей полного тока. Число  $Z$  релейных элементов БПЭ определяется по формуле

$$Z = 0,5n(n-1). \quad (7)$$

Выходы выявителей  $V_1$  и  $V_2$  управляют распределением активной и реактивной мощностями БЩСГ в ГТЭС согласно следующих алгоритмов.

Алгоритм распределения активной мощности между БЩСГ следующий:

- уменьшить частоту вращения привода БЩСГ с максимальным активным током статора БЩСГ при частоте на шинах  $\omega > \omega_c$ .
- увеличить одновременно частоту вращения приводов БЩСГ при частоте на шинах  $\omega \leq \omega_c$ .

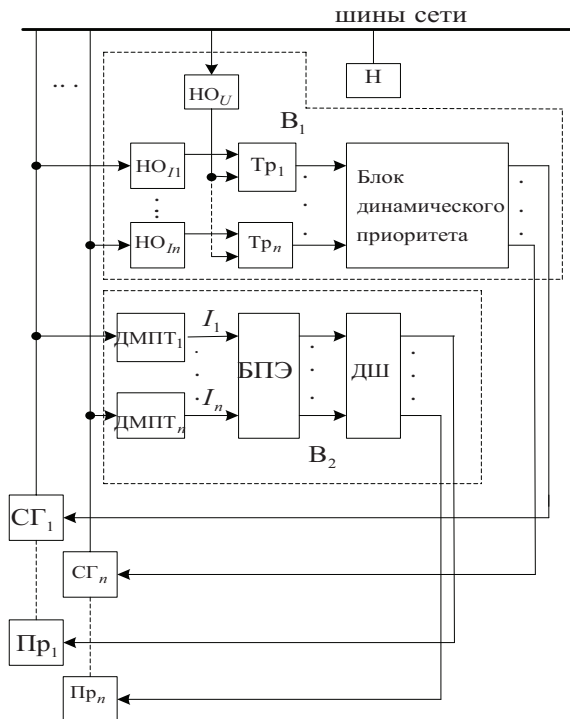
Алгоритм распределения реактивной мощности между БЩСГ:

- увеличить ток возбуждения  $i$ -БЩСГ с минимальным реактивным током статора при напряжении на шинах  $U \leq U_c$ .
- уменьшить одновременно токи возбуждения БЩСГ при напряжении на шинах  $U > U_c$ .

На рис. 1 приведена структурная схема управления параллельной работой БЩСГ по РЛМ в ПСК,

где собственные регуляторы напряжения генераторов не указаны.

Возможен и обратный вариант подключения выходов блока логики к управляющим органам БЩСГ и их приводов.



**Рис. 1.** Структурная схема управления параллельной работой БЩСГ по РЛМ в ПСК: НО<sub>u</sub> – нуль-орган по напряжению; (НО<sub>1</sub> – НО<sub>n</sub>) – нуль-органы тока; (ТР<sub>1</sub> – ТР<sub>n</sub>) – RS-триггеры; (ДМПТ<sub>1</sub> – ДМПТ<sub>n</sub>) – датчики модулей полного тока; БПЭ – блок пороговых элементов; ДШ – дешифратор; СГ<sub>i</sub> – i-БЩСГ; Пр<sub>i</sub> – i-привод

**Б.** Особенностью управления параллельной работой БЩСГ в ПСК по данному варианту в отличие от варианта А является сравнение относительных токов статоров БЩСГ через сравнение временных интервалов  $\Delta t$ , пропорциональных фазовым сдвигам между векторами тока и напряжения одноименной фазы статоров БЩСГ в ПСК, и релейно-логического сравнения активных составляющих токов БЩСГ. Очевидно также, что активная и реактивная составляющие мощности одноименной фазы первого генератора равны, соответственно (2):

$$\varphi_1 = \arctg \frac{I_{p1}}{I_{a1}}. \quad (8)$$

Из выражения активной  $P_1$  и реактивной  $Q_1$  мощностей (1) следует, что изменение их зависит от изменения угла сдвига фаз  $\varphi$  между векторами напряжения и тока одноименной фазы первого генератора.

Подставив (8) в (1), получим:

$$\Delta t_1 = \frac{1}{\omega_1} \arctg \frac{I_{p1}}{I_{a1}}. \quad (9)$$

Согласно (9) следует, чем больше реактивная мощность генератора, тем больше  $\Delta t$  и наоборот. Если ввести в рассмотрение параллельно работающий второй генератор, то для него, аналогично, можно записать:

$$\Delta t_2 = \frac{1}{\omega_2} \arctg \frac{I_{p2}}{I_{a2}}.$$

Сравнивая интервалы времени  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  при равных активных составляющих токах  $I_{a1}$  и  $I_{a2}$ , можно выявить генератор с большим или меньшим значением реактивной мощности. В выражениях (8), (9) обратная функция тангенс берется от относительной реактивной составляющей токов БЩСГ, где базисными значениями являются активные составляющие токов одноименной фазы. В выражениях (8), (9) принимается  $\omega_1 = \omega_2 = \dots = \omega = \omega_{ш} = \omega_{зад}$ .

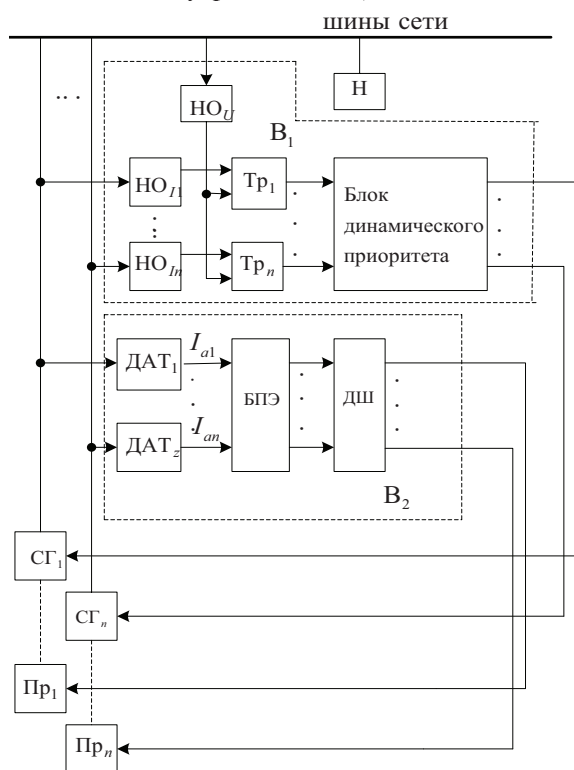
Таким образом, в качестве входных параметров для управления параллельной работы БЩСГ в ПСК с релейной настройкой обосновано применение временного интервала  $\Delta t$  и активной составляющей тока БЩСГ. Распределение реактивной/активной составляющих мощности между БЩСГ осуществляется ранжированием БЩСГ по временному интервалу (фазовому сдвигу между векторами тока и напряжения одноименной фазы) с помощью БДП, реализующего обработку входных сигналов с относительным приоритетом типа «первый пришел – первый обслужен», функционирующему аналогично вышеизложенному.

Для определения БЩСГ с максимальным активным током нагрузки через релейное сравнение введен выявитель  $V_3$  с настройкой на максимум, построенный на основании полного графа. Выявитель  $V_3$  состоит из датчиков активного тока (ДАТ) по числу БЩСГ, блока пороговых элементов (БПЭ) и дешифратора (ДШ). Выявитель  $V_3$  имеет математическое описание в виде системы логических уравнений.

$$\left. \begin{aligned} \tilde{V}_1 &= P_{1-2} \wedge P_{1-3} \wedge \dots \wedge P_{1-i} \wedge \dots \wedge P_{1-j} \wedge \dots \wedge P_{1-n}; \\ \tilde{V}_2 &= \bar{P}_{2-1} \wedge \bar{P}_{2-3} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{2-i} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{2-j} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{2-n}; \\ &\dots \dots \dots \\ \tilde{V}_i &= \bar{P}_{i-1} \wedge \bar{P}_{i-2} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{i-(i-1)} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{i-j} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{i-n}; \\ &\dots \dots \dots \\ \tilde{V}_j &= \bar{P}_{j-1} \wedge \bar{P}_{j-2} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{j-i} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{j-(j-1)} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{j-n}; \\ &\dots \dots \dots \\ \tilde{V}_n &= \bar{P}_{n-1} \wedge \bar{P}_{n-2} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{n-i} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{n-j} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{n-(n-1)} \end{aligned} \right\}$$

где  $\tilde{V}_1, \tilde{V}_2, \dots, \tilde{V}_n$  – выходы выявителя  $V_3$  с настройкой на максимум;  $n$  – число генераторов ГТЭС;  $P_{1-2}, \dots, P_{i-j}, \dots, P_{n-(n-1)}$  – прямые пороговые функции сравнения активных токов;  $\bar{P}_{1-2}, \dots, \bar{P}_{i-j}, \dots, \bar{P}_{n-(n-1)}$  – инверсные пороговые функции сравнения активных токов. Число  $Z$  релейных элементов БПЭ определяется по формуле (7).

На рис. 2 приведена структурная схема управления параллельной работой БЩСГ по РЛМ в ПСК по варианту Б, где собственные регуляторы напряжения генераторов не указаны. Моделирование подтвердило возможность управления БЩСГ в ГТЭС по РЛМ.



**Рис. 2.** Структурная схема управления параллельной работой БЩСГ по РЛМ в ПСК:  $HO_0$  – нуль-орган по напряжению; ( $HO_1$ – $HO_n$ ) – нуль-органы тока; БПЭ – блок пороговых элементов; ДШ – дешифратор;  $СГ_i$  – i-БЩСГ;  $Пр_i$  – i-привод; ( $Tr_1$ – $Tr_n$ ) – RS-триггеры; ( $ДАТ_1$ – $ДАТ_n$ ) – датчики активного тока

Для проверки работоспособности системы управления параллельной работы БЩСГ с сетью бесконечной мощности по варианту А разработана цифровая модель «РЛМ» [2]. Два БЩСГ представлены в виде дифференциальных уравнений Парка-Горева в модификации Л.П. Веретенникова, т. е. записаны через внутреннюю ЭДС в аномальной системе относительных единиц. На шины бесконечной мощности включена пассивная и асинхронная нагрузки. Результаты моделирования подтверждают распределение нагрузки между генераторами с заданной точностью.

### Выводы

1. Показано, что релейно-логический метод распределения активной и реактивной мощности при параллельной работой синхронных генераторов, работающих на шины бесконечной мощности, обеспечивает мгновенную реакцию при включении асинхронной нагрузки, что повышает статическую и динамическую устойчивость в работе, исключает уравнильные провода для выравнивания напряжения возбуждителей генераторов и является альтернативным решением по отношению к методу внутреннего статизма, широко применяемого на современных электростанциях.
2. Разработаны варианты структурных схем управления параллельной работой генераторов с сетью бесконечной мощности по релейно-логическому методу в полярной системе координат.
3. Созданы алгоритмы управления параллельной работой генераторов с сетью бесконечной мощности по релейно-логическому методу в полярной системе координат.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москалев А.Г. Автоматическое регулирование режима энергетической системы по частоте и активной мощности. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 240 с.
2. Хижняков Ю.Н. Комбинированный метод управления параллельной работой генераторов переменного тока. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 1999. – 114 с.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Изд. 6-е, перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1973. – 752 с.
4. Устройство динамического приоритета: а. с. 1670687 СССР; опубл. в Б.И. 1991. – № 30.

Поступила после переработки 12.03.2010 г.